基于改进RVA法的黑河上游水文情势变化分析

张如强[1]， 刘俊国[2]， 冒甘泉[2]， 王 丽[3]
（1. 重庆工商大学，重庆 400067；2. 南方科技大学环境科学与工程学院，广东 深圳 518055；
3. 重庆交通大学河海学院，重庆 400074）

摘 要：客观地评价水文情势变化是进行河流生态修复和流域水资源综合管理的基础。改进RVA法将径流典型年份的变化纳入整体改变度的计算过程中，相对更全面地评价径流水文情势的变化。近几十年来黑河流域气候条件的发生显著变化，黑河上游河流水文情势的变化情况仍需进一步研究。以黑河上游为研究区域，应用M-K检验识别径流的突变年份，采用改进RVA法计算分析黑河上游河流水文情势变化。结果表明，黑河上游径流的突变年份为2002年，2002年前后分别以平水年和丰水年为主；采用RVA法计算的整体改变度为54.68%，而改进的RAV方法计算的整体改变度为74.62%，说明RVA法低估了黑河上游水文情势整体改变度；黑河上游径流水文情势变化主要包括：相比于1960—2002年，2003—2015年后各月平均流量均呈不同程度增加，但最小1日、3日、7日和最大7日流量减小，其余极端流量指标呈不同程度增加，高、低流量发生次数及历时变化微弱，流量平均增加率、减小率以及逆转次数均增加；采用改进的RVA法计算的黑河上游水文情势的整体改变度为74.62%，属于高度改变。气候变化是导致黑河上游水文情势高度改变的主要原因。

关键词：河流水文情势变化；RVA法；典型年份；黑河上游

水文情势决定并影响着河流生态系统的物质循环、能量过程、物理栖息地状况。随着气候变化效应凸显，人类活动加剧，河流的水文情势发生了显著变化，这些变化直接影响河流生态系统的生物群落组成及结构[1]。客观地评价水文情势变化是进行河流生态修复和流域水资源综合管理的基础。评价河流水文情势变化的常用方法为水文变化指标法（Index of Hydrological Alteration，IHA）以及在此基础上发展的变动范围法（Range of Variability Approach，RVA法）。目前，RVA法已经广泛应用到国内外河流径流情势变化评价中。Galat等[2]对比了1929—1948年与1967—1996年两个时期密苏里河11个观测站点径流水文情势的变化。Shiau等[3]评价了分水堰的修建对Chou-Shui Creak河的影响。Irwin等[4]评价了1924—1980年和1984—1996年Tallapoosa河流量特征的变化。郭文献等[5]采用RVA法分析了丹江口水库对汉江中下游径流情势的影响。李兴拼等[6]研究了枫树坝水库的运行对东江上游径流情势的影响，结果表明东江上游的径流情势发生中度改变。陈玺等[7]、马梦梦等[8]应用RVA法对河流水文情势的变化进行了分析。相关研究表明，RVA在计算整体改变度时将变化前后两个时间段各视为一个整体，忽略了径流典型年份的变化，会导致对水文情势变化判断的不准确，进而对水资源管理产生不利影响[9]。本文采用改进的RVA法，将径流典型年份的变化纳入整体改变度的计算过程中，可相对更全面地评价径流水文情势的变化。

黑河是我国第二大内陆河流，中游张掖地区是古丝绸之路、今欧亚大陆桥要地，下游额济纳地区是我国重要的国防科研基地。流域内生态环境建设与保护还关系到西北、华北地区的环境质量，具有重要的战略地位。黑河流域水资源时空分布严重不均，流域水资源供需矛盾突出[10]，是限制该区

收稿日期：2020-02-29； **修订日期：**2020-05-07
基金项目：中国科学院A类战略性先导科技专项（XDA20100104）；国家自然科学基金项目（41625001）；南方科技大学亮点项目（G02296302，G02296402）；重庆工商大学高层次人才项目（2056011）
作者简介：张如强（1984-），男，博士，主要从事水文与水资源的研究. E-mail: zhangruqiang2009@163.com
通讯作者：刘俊国. E-mail: junguo.liu@gmail.com

经济社会发展的主要障碍，也是造成其生态环境极度脆弱的主要原因。黑河流域70%左右的径流产生于莺落峡水文站以上的上游地区，且中下游90%以上的水资源都依赖上游补给[10]。黑河上游的水文情势变化对整个流域水资源具有重要影响。

国内外学者对黑河流域水文特征及生态环境变化开展了一些研究。王根绪等[11]对比分析了20世纪40年代以来不同时期黑河流域水文及生态环境的变化特征，并对不同时期流域水土资源开发规模及出山径流的变化进行了分析，结果表明，黑河流域水系发生根本性变化。李弘毅等[12]综合研究了黑河上游祁连山冰沟流域积雪水文情势，并分析了冻土水热变化过程和融雪径流变化特征。郭巧玲等[13]研究了黑河流域径流年内分配变化。党素珍等[10]研究了黑河上游的基流及其变化特征，表明黑河上游及流量年内变化先增后减，年际变化呈增加趋势，而基流指数呈减少趋势。邹悦等[14]研究了黑河流域莺落峡站河道内生态需水，指出1997年前后河道内生态需水和满足生态需水出现频率变化显著。程国栋等[15]对黑河流域生态-水文过程集成开展了研究，初步揭示了流域生态水文过程耦合机理，形成了黑河关键地区水循环系统的基本认识。Sang等[16]分析了变化环境对黑河上中游径流的影响，指出上游降水增加和温度的上升导致径流的增加。王宇涵等[17]研究了冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响，指出黑河上游在近54 a内呈现上升趋势，其中以基流上升为主。李秋菊等[18]分析了黑河上游径流变化及其原因，并量化了降水、冰川融雪以及蒸散发对径流增加的贡献。随着近几十年来黑河气候条件的显著变化，上游河流水文情势的变化情况仍需进一步研究。本文以黑河上游为研究区域，收集莺落峡水文站1960—2015年逐日观测流量，应用Mann-Kendall检验（M-K检验）识别径流的突变年份，采用改进RVA法计算了水文情势的整体改变度，并分析了其水文情势变化的主要原因，为流域河流生态修复和水资源综合管理提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

本文选取黑河干流上游为研究区，其位置及DEM如图1所示。黑河干流以莺落峡和正义峡为界，分为上游、中游和下游。莺落峡水文站以上为上游，干流上游面积约10000 km^2，海拔高度约在1600 ~ 5100 m。该地区气候寒冷，年平均温度为-5~4℃[11]。土地利用类型以森林、草地、岩石和裸地为主。

1.2 数据来源

收集莺落峡水文站1960—2015年逐日观测流量数据以及研究区周边4个气象站的逐日降水数据，研究区水文站与气象站的位置如图1所示。数据源于“国家青藏高原科学数据中心”（http://westdc.westgis.ac.cn/）。

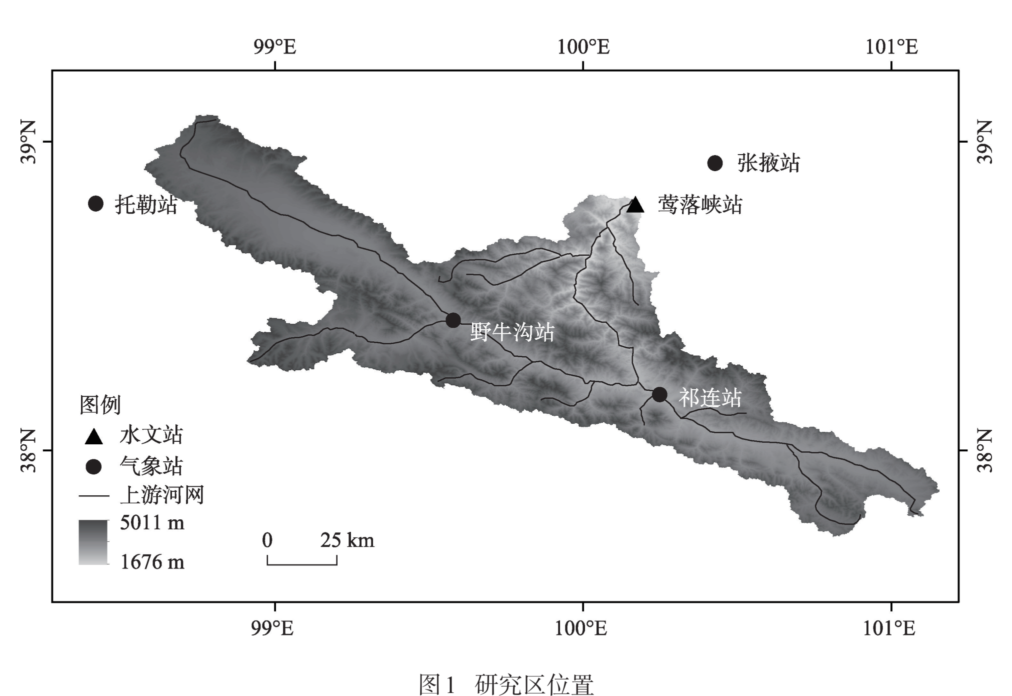


图1 研究区位置

Fig. 1 Location and DEM of the study area

2 研究方法

黑河上游水文情势变化分析主要分为以下几个步骤：首先，采用M-K检验识别径流的突变年份，将观测数据划分为突变前后两个水文序列；然后，采用改进的RVA方法计算河流水文情势的整体改变度，具体步骤包括：选取IHA法分析河流水文情势的变化情况，该方法包含反映数量大小、发生时间、持续时间、频率以及变化率等特征的5组共计33个水文指标；在IHA法基础上，采用RVA法计算33个水文指标的改变度；采用欧拉距离计算径流突变年份前后典型年份(丰、平、枯水年)的变化，结合IHA法计算的水文指标的改变度和欧拉距离，计算河流水文情势的整体改变度。

2.1 M-K检验

M-K检验最初由Mann和Kendall提出[19]。该方法在时间序列趋势分析及突变点识别时，不要求样本遵循一定的分布，也不受异常值的干扰且计算简便，因此，受到世界气象组织推荐，普遍应用于水文、气象等非正态分布的数据分析[20-21]。本文选用该方法进行突变点的识别。

2.2 改进的RVA法

改进RVA方法首先由Yin等提出[9]，在常用的河流水文情势变化评价方法RVA[22-24]的基础上考虑了径流典型年份的变化，使计算结果相对更合理。该方法通过欧拉距离[25]计算典型年份的变化，再将计算结果代入水文情势改变度的计算中，从而将径流典型年份的变化纳入水文情势变化评价当中。改进RVA方法具体步骤及计算如下：

丰、平、枯水年分别赋值2、1、0。径流突变前后典型年份的分布情况为($A_1, A_2, \cdots, A_a$)和($B_1, B_2, \cdots, B_b$)，A_i和B_i=0、1、2，欧拉距离(ED)的公式[25]为：

$$\text{如果}a=b,\ \text{那么},\ ED=\sqrt{\sum_i^a (A_i-B_i)^2} \tag{1}$$

$$\text{如果}a>b,\ \text{那么},\ ED=\min\sqrt{\sum_i^b (A_{k+i}-B_i)^2},\quad k=0,1,2\cdots n-k \tag{2}$$

$$\text{如果}a<b,\ \text{那么},\ ED=\min\sqrt{\sum_i^a (A_i-B_{k+i})^2},\quad k=0,1,2\cdots n-k \tag{3}$$

式中：当A_i和B_i同为丰水年、平水年或枯水年时，$|A_i-B_i|=0$；当A_i和B_i中一个为平水年，另一个为丰水年或者枯水年时，$|A_i-B_i|=1$；当A_i和B_i分别为枯水年和丰水年或者丰水年和枯水年时，$|A_i-B_i|=2$。

将计算出的欧拉距离进行标准化，公式如下：

$$S=\frac{ED}{T\times\min(\sqrt{a},\sqrt{b})} \tag{4}$$

式中：S表示标准化后的欧氏距离，用于衡量径流的丰、平、枯水年的变化，变化范围为[0，1]，数值越大表示变化越大；ED表示欧拉距离；T表示典型年份的最大距离，当有3种典型年份(丰、平、枯水年)时，T=2。

Grantz等[26]定义丰水年为流量大于或等于总记录第75百分位流量的年份，枯水年为流量小于总记录第25百分位流量的年份，流量介于两者之间的年份为平水年。文章采用该方法，将1960—2015年共计56 a划分为丰水年、平水年和枯水年。

考虑典型年份变化的整体改变度的计算公式为[9]：

$$OD=1-(1-D_0)(1-S) \tag{5}$$

式中：OD表示整体改变度，OD值介于0~33%时为低度改变，介于33%~67%时为中度改变，介于67%~100%为高度改变；D_0表示RVA法计算的整体改变度；S表示标准化后的欧氏距离。

D_0具体计算公式为：

$$D_0=\frac{1}{A}\sum_{m=1}^{A}D_m \tag{6}$$

式中：A表示IHA水文指标总数，IHA水文指标主要包括月平均流量、年极端流量、年极端值发生时间、高低流量发生频率及持续时间和流量变化改变率及频率(次)5大类，共33个指标[20]；D_m表示第m个IHA指标的改变度。

每个IHA水文指标改变度的计算公式[23]如下：

$$D_m=\left|\frac{N_m-N_e}{N_e}\right|\times 100\% \tag{7}$$

$$N_e=r_m\times N_b \tag{8}$$

式中：D_m表示第m个水文指标的改变度，D_m值介于0~33%时为低度改变，介于33%~67%时为中度改变，介于67%~100%为高度改变；N_m表示第m个指标在变化后实际落入变化范围内的年数，N_e表示第m个指标变化后预期落入变动范围内的年数；r_m表示

变化前第m个指标落在变化范围内的比例，即变化前第m个指标落入变化范围内年数与变化前流量记录总年数的比值；N_b表示变化后流量记录的总年数。

3 结果与分析

3.1 黑河上游水文指标变化

3.1.1 黑河上游年均流量突变点的识别 利用M-K检验方法对莺落峡水文站1960—2015年均流量数据进行突变检验，*UF*和*UB*曲线如图2所示。结果表明，*UF*与*UB*仅有一个交点，该交点的横坐标为2002年，表明莺落峡站流量在2002年发生了突变。因此，将1960—2015年分为1960—2002年和2003—2015年两个时期。1960—2015年均流量如图3所示，1960—2002年均流量为48.6 $m^3 \cdot s^{-1}$，而2003—2015年均流量为60.5 $m^3 \cdot s^{-1}$，观测流量增幅为24.49%。

3.1.2 突变前后的水文指标的变化 基于M-K方法识别的突变点将观测径流数据划分为两个水文序列，并对两个水文序列采用RVA进行分析（表1），各指标改变程度如图4所示。

（1）各月平均流量。由表1可以看出，突变后莺落峡水文站各月的平均流量均增加。其中，1月、2月和5月流量的变化率较小，接近10%；8—11月流量的变化率最大，在50%左右，表明8—11月平均流量的增加最为明显。各月平均流量改变度中，5月、6月最小，均为15.05%，7月份为28.09%，属于低度改变；1月、2月、12月的改变度介于33%～67%，属于中度改变；其余月份的改变度均大于67%，属于高度改变。

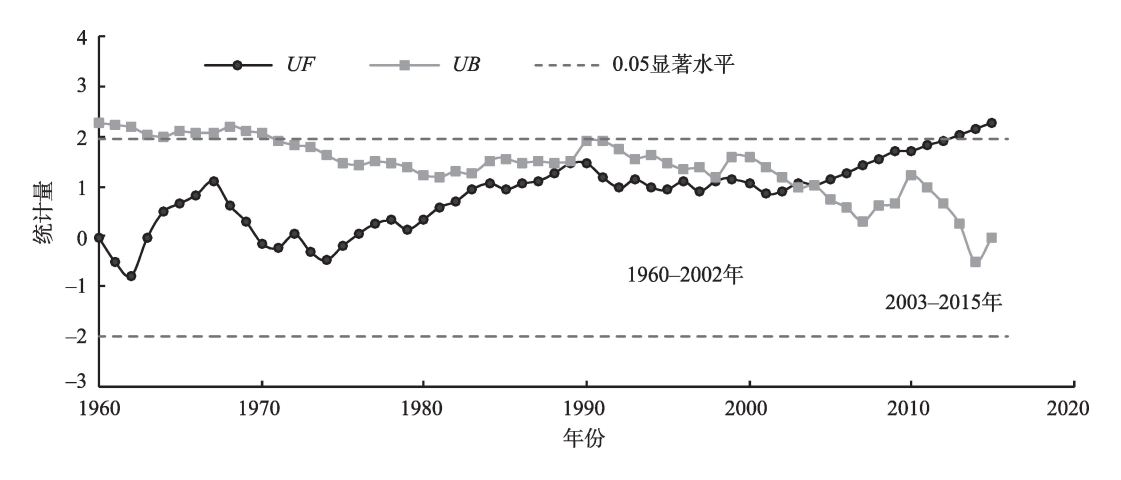


图2 黑河上游莺落峡水文站流量的M-K检验

Fig. 2 M-K test of the observed runoff at Yingluoxia hydrologic station

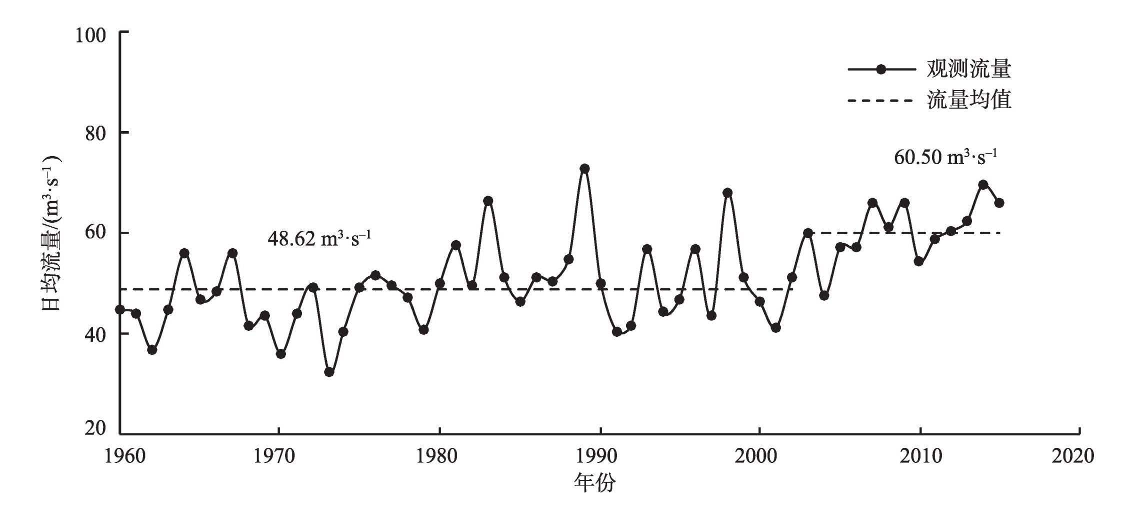


图3 黑河上游莺落峡水文站1960—2015年日均流量

Fig. 3 The mean annual flow at Yingluoxia hydrologic station from 1960 to 2015

表1 莺落峡水文站观测流量IHA水文指标统计表

Tab. 1 Statistics of IHA index at Yingluoxia hydrologic station

IHA指标类别	水文指标	变化前	变化后	变化率/%	改变度/%	程度
月平均流量	1月	12.9	14	8.53	42.47	中度
	2月	13.69	14.65	7.01	42.47	中度
	3月	15.59	22.6	44.96	71.24	高度
	4月	22.88	32.15	40.52	85.62	高度
	5月	37.8	41.2	9.00	15.05	低度
	6月	61.45	74.05	20.51	15.05	低度
	7月	103.9	131	26.07	28.09	低度
	8月	87	129	48.28	71.24	高度
	9月	69.35	102.8	48.16	71.24	高度
	10月	35.27	52.6	49.14	100	高度
	11月	22.5	34	51.11	100	高度
	12月	14.9	16.9	13.42	58.65	中度
年极端流量	最小1日	8.08	0	-100.00	85.62	高度
	最小3日	8.757	0	-100.00	85.62	高度
	最小7日	9.473	4.187	-55.80	85.62	高度
	最小30日	11.74	11.89	1.26	28.09	低度
	最小90日	14	16.81	20.09	56.86	中度
	最大1日	351	404	15.10	29.43	低度
	最大3日	299	312.7	4.57	43.81	中度
	最大7日	243.9	239.3	-1.90	43.81	中度
	最大30日	153.7	171.9	11.82	28.09	低度
	最大90日	114.1	135.3	18.51	85.62	高度
	零流量天数	0	9		76.92	高度
	基流指数	0.20	0.07	-64.89	85.62	高度
年极端值发生时间	最小1日流量发生时间	4	36	800	22.51	低度
	最大1日流量发生时间	205	212	3.83	31.09	低度
高、低流量发生频率及持续时间	年低流量发生次数	7	8	14.29	14.25	低度
	年低流量平均历时	3.5	5	42.86	26.5	低度
	年高流量发生次数	6	7	16.67	25.31	低度
	年高流量平均历时	5	4.5	-10.00	65.38	中度
流量变化改变率及频率/次	流量平均增加率	1.7	2.5	47.06	73.54	高度
	流量平均减少率	-2	-3.1	55.00	85.62	高度
	每年流量逆转次数	143	150	4.90	24.04	低度

注:流量单位为$m^3 \cdot s^{-1}$,年极端流量发生时间为罗马日,高低流量发生频率及持续时间单位分别为次·年$^{-1}$和日,流量变化改变率单位为$m^3 \cdot s^{-1} \cdot d^{-1}$,每年流量逆转次数为次·年$^{-1}$。

(2) 年极端流量。变化后,最小1日、3日、7日流量均呈减小趋势,且减小幅度均超过50%;而最大流量中,除最大7日流量外,均呈增加趋势,其中最大90日流量增加最大,变化率为18.51%;断流天数从变化前的0日变为9日。年极端流量的改变度中,最小30日流量、最大1日流量和最大30日流量分别为28.09%、29.43%和28.09%,属于低度改变;最小90日流量、最大3日流量和最大7日流量的改变度分别为56.86%、43.81%和43.81%,为中度改变;其余水文指标的改变度均大于67%,属于高度改变。

(3) 年极端流量发生时间。变化后,最小1日流量和最大1日流量出现的时间均推迟,其中最小1日流量出现日期推迟了32日;最大1日流量的发生日期推迟了7日。最小1日和最大1日流量的改变度分别为25.51%和31.09%,属于低度改变。

(4) 高、低流量的频率及历时。变化后,低流量

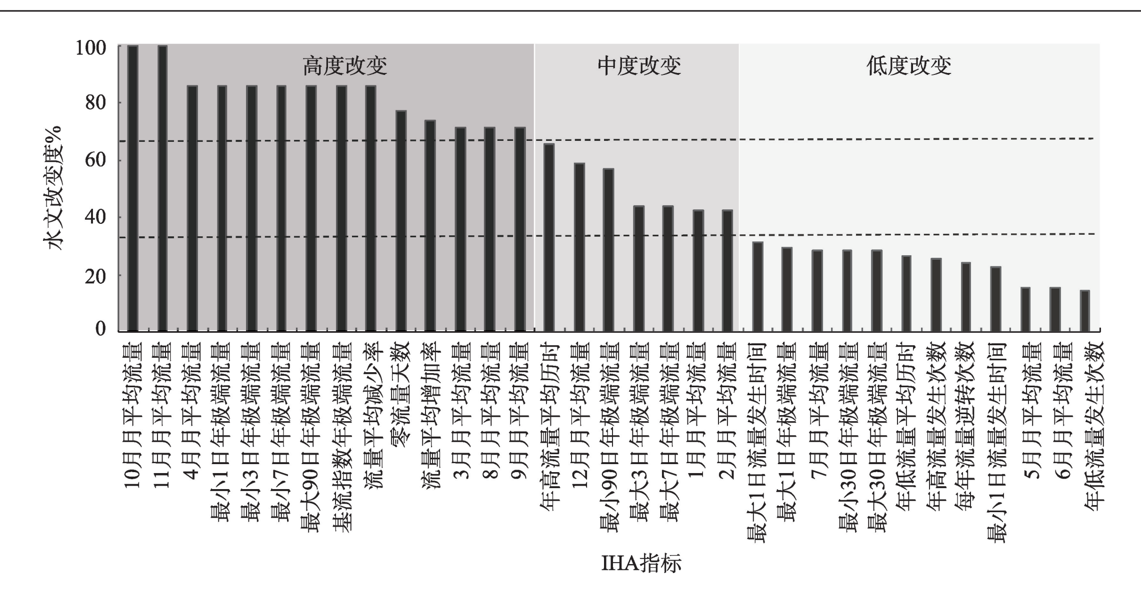


图4 黑河上游莺落峡IHA指标改变度

Fig. 4 The alteration degree of IHA index at Yingluoxia hydrologic station

出现的次数和平均历时分别增长了14.29%和42.86%;高流量出现的次数增加了16.67%,但高流量平均历时减少约10%。低流量发生次数、平均历时和高流量发生次数的改变度分别为14.25%、26.50%和25.31%,均属于低度改变;而高流量平均历时的改变度分别为65.38%,属于中度改变。

(5) 流量变化改变率及频率。变化后,流量平均增加率、减小率以及逆转次数均有所增加,其中前两者的增加幅度在50%左右,而逆转次数的增加幅度较小,为4.9%。每年流量逆转次数的改变度为24.04%,属于低度改变;而流量平均增加率和减小率发生显著变化,属于高度变化。

从表1中可以看出,黑河上游年内径流量主要集中在6—10月;1960—2015年黑河上游月平均径流呈增加趋势,年极端径流中多个指标也呈增加趋势。王杰[27]采用SWAT模型预测和分析了黑河上游径流对未来气候变化的响应,结果表明,年内径流主要集中在6—9月,且研究区内三个水文站的年径流量呈增加趋势;李秋菊等[18]采用Budyko假设下的张橹经验公式定量分析了黑河上游径流的变化,指出1960—2015年莺落峡站径流量显著增加,这些研究验证了本文的分析。

3.2 黑河上游水文情势改变度

进一步分析黑河上游径流典型年份的变化情况(表2),可以发现,1960—2002年黑河上游以平水年和枯水年为主,两者分别占总年数的58.1%和32.6%;而2003—2015年则以丰水年为主,占总年数的76.9%,表明黑河上游的径流在突变年份前后两个时期(1960—2002年与2003—2015年)典型年份组成发生了显著变化。同时分析突变年份前后各月月均流量值变化情况(表1),可以看出年内6个月(3月、4月、8月、9月、10月、11月)的改变程度达到了高度改变。

表2 1960—2015年典型年份的分布情况

Tab. 2 Distribution of hydrological year types between 1960 to 2015

时段	统计量	枯水年	平水年	丰水年	*ED*	*S*
1960—2002年	年数	14	25	4	3.16	0.44
	比例/%	32.6	58.1	9.3		
2003—2015年	年数	0	3	10		
	比例/%	0	23.1	76.9		

注:*ED*表示欧拉距离;*S*表示标准化后的欧氏距离,数值越大表示变化越大。下同。

根据公式(1)、(2)及(3)计算IHA指标的改变度,采用RVA方法计算的整体改变度为54.68%。根据公式(7)和(8),改进的RAV方法计算的整体改变度为74.62%(如表3所示),大于67%,属于高度改变。说明RVA方法计算黑河上游水文情势变化忽视了径流典型年份的变化,造成了对黑河流域水文情势整体改变度的低估。

3.3 黑河上游水文情势变化原因分析

从上文的分析结果可以看出,黑河上游河流水文情势发生了高度改变。水文情势变化的原因可分为人类活动和气候变化。黑河上游人类活动的

表3 黑河上游水文情势整体改变度计算结果

Tab. 3 The alteration degree of the hydrological regime considering the characteristics of hydrological year types

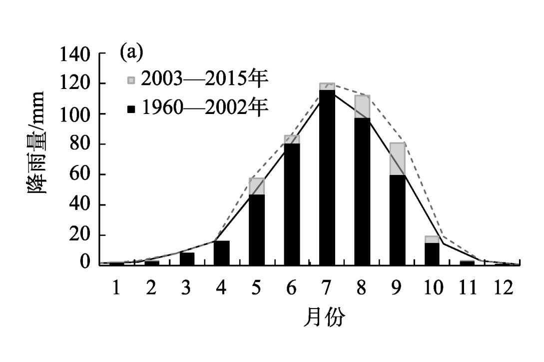
	RVA	改进的RVA
D_0	54.68%	-
S	-	0.44
OD	-	74.62%
改变程度	中	高

注：D_0表示RVA法计算的整体改变度；OD表示由改进的RVA法计算的整体改变度。

影响微弱[28-29]，因此，本文对黑河上游周边4个气象站的观测降水和气温变化进行了分析。

通过M-K检验分析可得，1960—2015年4个气象站的观测降水均呈增加趋势；4个气象站中，托勒站和野牛沟站1960—2015年的观测降水的突变年均为2002年，而张掖站和祁连站观测降水包含多个突变点。根据泰森多边形法加权计算的黑河上游的降水量，2002年前后年均降水量分别为443.99 mm和507.17 mm，降水增加了14.23%（图5）。从图5可以看出，降水主要集中在夏季和秋季，同时，夏、秋季也是降水增加量较大的季节，这与王宇涵等[17]研究结论一致；除了3月和12月份的降水呈微弱减少外，其他各月的平均流量均呈不同程度的增加，增加量最大的为8月和9月，分别增加14.8 mm和21.96 mm。降水的增加导致平均流量改变度显著变化，例如8月、9月、10月和11月的平均流量的改变度均大于67%，属于高度改变，而且降水的增加还导致其他极值流量成不同程度的增加，如最大90日流量的改变度为85.62%，属于高度改变（图5）。

4个气象站1960—2015年观测气温的年均值如图6所示。4个气象站观测温度的年均值均呈增加



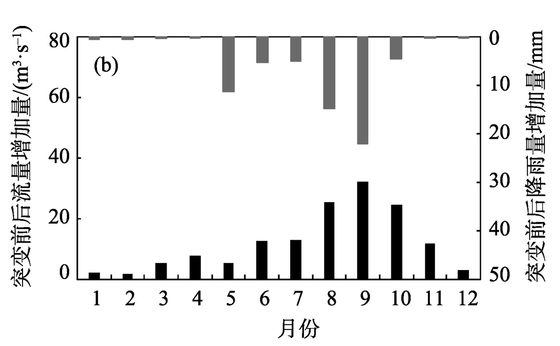


图5 2002年前后月均降雨量和月均流量

Fig. 5 Monthly precipitation and runoff of upper Heihe River Basin from 1960 to 2015

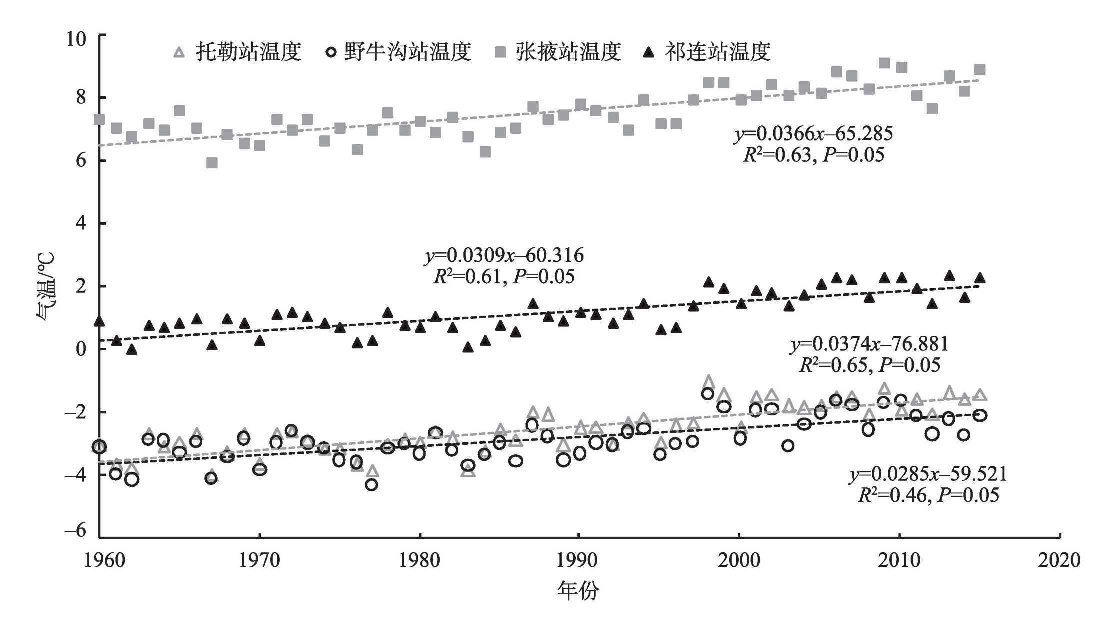


图6 黑河上游周边气象站年均气温及变化趋势

Fig. 6 Mean annual temperature of meteorological stations in and around upper Heihe River basin

趋势，这与李占玲等[29]的研究结果一致。一方面，气温的升高增加了流域蒸散发，造成径流的减少，李秋菊等[18]研究表明，2004—2015年，蒸散发对径流增加的贡献率有-35%；另一方面，气温的升高导致冰川融水的增多，导致径流的增加，黑河上游冰川及融雪径流约占总径流的10%[30]，Sang等[16]研究结果表明温度的升高有利于径流的增加。王宇涵等[17]研究表明，气温的升高对径流的增加有贡献，这是因为气温升高导致高寒山区冻土活动层增厚，增加了土壤蓄水容量，从而导致降雨下渗量增加和基流量增大。总体而言，黑河上游对气候变化敏感[31]，黑河上游径流的增加主要是受"暖湿"气候影响[32]，降水与气温升高均有助于径流的增加，导致春季径流增加的主要因素为温度，降水次之；而导致夏秋、秋季径流增加的主要因素为降水，温度次之[17]。

4 结 论

径流典型年份(丰、平、枯水年)的变化对河流生态系统的结构和功能具有重要影响。改进的RVA法将径流典型年份的变化纳入整体改变度的计算过程中，相对全面地评价径流水文情势的变化。改进RVA与原来的RVA对数据的要求相似，具有普遍适用性。本文采用改进的RVA分析了黑河上游河流水文情势的变化情况。整体而言，黑河上游河流水文情势发生了高度改变，黑河上游各月平均径流、年极端流量大多数指标和流量变化改变率以及逆转次数基本呈不同程度的增加。黑河上游水文情势的变化与降水等气候因素密切相关，气候变化是导致黑河上游水文情势高度改变的主要原因。

参考文献(References)：

[1] 赵利, 彭期冬, 李翀, 等. 长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区干流生态水文变化分析[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 106–111. [Zhao Li, Peng Qidong, Li Chong, et al. Analysis of eco-hydrological alteration of upper Yangtze mainstream sections in the nature reserves for rare and endemic fishes[J]. Journal of Hydroelecric Engineering, 2014, 33(3): 106–111.]

[2] Galat D L, Lipkin R. Restoring ecological integrity of great rivers: historical hydrographs aid in defining reference conditions for the Missouri River[J]. Hydrobiologia, 2000, 149(4): 29–48.

[3] Shiau J T, Wu F C. Assessment of hydrologic alterations caused by Chi-Chi diversion weir in Chou-Shui Creek, Taiwan: Opportunities for restoring natural flow conditions[J]. River Research and Applications, 2004, 20(4): 401–412.

[4] Irwin E R, Freeman M C. Proposal for adaptive management to conserve biotic integrity in a regulated segment of the Tallapoosa river, Alabama, U. S. A[J]. Conservation Biology, 2010, 16(5): 1212–1222.

[5] 郭文献, 夏自强, 王乾. 丹江口水库对汉江中下游水文情势的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(6): 733–737. [Guo Wenxian, Xia Ziqiang, Wang Qian. Effects of Danjiang Reservoir on hydrological regimes in the middle and lower researcher of Hanjiang River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2008, 36(6): 733–737.]

[6] 李兴拼, 黄国如, 江涛. RVA法评估枫树坝水库对径流的影响[J]. 水电能源科学, 2009, 27(3): 18–21. [Li Xingpin, Huang Guoru, Jiang Tao. Evaluating alteration of runoff after Fenshuba Reservoir construction based on RVA method[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(3): 18–21.]

[7] 陈玺, 郭卫. 基于RVA法的黄河中游建库后河道水文变异分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11): 5–8. [Chen Xi, Guo Wei. Variation analysis of hydrological situation in the middle reaches of Yellow River after reservoirs construction based on range of variability approach[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(11): 5–8.]

[8] 马梦梦, 艾萍, 边世哲, 等. 基于变动范围法的宜昌站水文情势影响分析[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 14–17. [Ma Mengmeng, Ai Ping, Bian Shizhe, et al. Hydrological regime impact analysis of Yichang Station based on range of variability approach [J]. Water Resources and Power, 2018, 36(3): 13–17.]

[9] Yin X, Yang Z, Petts G E. A new method to assess the flow regime alterations in riverine ecosystems[J]. River Research and Applications, 2015, 31(4): 497–504.

[10] 党素珍, 王中根, 刘昌明. 黑河上游地区基流分割及其变化特征分析[J]. 资源科学, 2011, 33(12): 2232–2237. [Dang Suzhen, Wang Zhonggen, Liu Changming. Baseflow separation and its characteristics in the upper reaches of the Heihe River Basin[J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2232–2237.]

[11] 王根绪, 程国栋. 近50 a来黑河流域水文及生态环境的变化[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 233–238. [Wang Genxu, Cheng Guodong. Changes of hydrology and ecological environment during late 50 years in Heihe River Basin[J]. Journal of Desert Research, 1998, 18(3): 233–238.]

[12] 李弘毅, 王建, 白云洁, 等. 黑河上游冰沟流域典型积雪期水文情势[J]. 冰川冻土, 2009. 31(2): 293–300. [Li Hongyi, Wang Jian, Bai Yunjie, et al. The snow hydrological processes during a representative snow cover period in Binggou Watershed in the upper reaches of Heihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(2): 293–300.]

[13] 郭巧玲, 杨云松, 畅祥生, 等. 1957—2008年黑河流域径流年内

分配变化[J]. 地理科学进展, 2011, 30(5): 550-556. [Guo Qiaoling, Yang Yunsong, Chang Xiangsheng, et al. Annual variation of Heihe River runoff during 1957-2008[J]. Progress in Geography, 2011, 30(5): 550-556.]

[14] 邹悦, 张勃. 黑河流域莺落峡站河道内生态需水研究[J]. 地球科学进展, 2012, 31(5): 625-631. [Zou Yue, Zhang Bo. The study of ecological water demand at Yingluoxia station of Heihe River[J]. Progress in Geography, 2012, 31(5): 625-631.]

[15] 程国栋, 肖洪浪, 傅伯杰, 等. 黑河流域生态-水文过程集成研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(4): 431-437. [Cheng Guodong, Xiao Honglang, Fu Bojie, et al. Advances in synthetic research on the eco-hydrological process of the Heihe River Basin [J]. Advances in Earch Science, 2014, 29(4): 431-437.]

[16] Sang Y F, Wang Z G, Liu C M, et al. The impact of changing environments on the runoff regimes of the arid Heihe River basin, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 115: 187-195.

[17] 王宇涵, 杨大文, 雷慧闽, 等. 冰冻圈水文过程对黑河上游径流的影响分析[J]. 水利学报, 2015, 46(9): 1064-1071. [Wang Yuhan, Yang Dawen, Lei Huimin, et al. Impact of cryosphere hydrological processes on the river runoff in the upper reaches of Heihe River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(9): 1064-1071.]

[18] 李秋菊, 李占领, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 31-39. [Li Qiuju, Li Zhanling, Wang Jie. Variation and attribution of runoff over the uper reaches of Heihe River Basin[J]. Sounth-to-North Water Transfers and Water Sciences and Technology, 2019, 17(3): 31-39.]

[19] Mann H, Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.

[20] Shao Q, Li Z, Xu Z. Trend detection in hydrological time series by segment regression with application to Shiyang River Basin[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2010, 24 (2): 221-233.

[21] 李深林, 陈晓宏, 赖成光, 等. 珠江三角洲地区近30年降雨变化趋势及其与气溶胶的关系[J]. 水文, 2016, 36(4): 31-36. [Li Shenlin, Chen Xiaohong, Lai Chengguang, et al. Precipitation change trend in Pearl River Delta area and relation with aerosol from 1980 to 2010[J]. Journal of China Hydrology, 2016, 36(4): 31-36.]

[22] Richter B D, Baumgartner J, Powell J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ccosystems[J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163-1174.

[23] Richter B, Baumgartner J, Braun D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. River Research and Applications, 1998, 14(4): 329-340.

[24] Richter B, Baumgartner J, Wigington R, et al. How much water does a river need?[J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231-249.

[25] 张如强. 黑河上游水文情势与湿地景观格局变化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018. [Zhang Ruqiang. Hydrological Regime Alteration and Wetland Landscape Pattern Change in Upper Heihe River Basin[D]. Beijing: Beijing Foresty University, 2018.]

[26] Grantz K, Rajagopalan B, Clark M, et al. A technique for incorporating large- scale climate information in basin- scale ensemble streamflow forecasts[J]. Water Resources Research, 2005, 41(10): 3251-3261.

[27] 王杰. 气候变化条件下黑河上游径流模拟及预测[D]. 北京: 中国地质大学, 2019. [Wang Jie. Simulation and Prediction of Runoff in the Upper Reaches of Heihe River Basin under Climate Change Conditions[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.]

[28] 刘浏, 刘丽丽, 索滢. 近53 a黑河流域水文气象要素时空演变特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 465-478. [Liu Liu, Liu Lili, Suo Ying. Spatiotemporal evolution of hydro- meteorological variables in the Heihe River Basin in recent 53 years[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 465-478.]

[29] 李占玲, 王小娟. 黑河中上游气象要素单调变化趋势分析[J]. 地理研究, 2011, 30(11): 2059-2066. [Li Zhanling, Wang Xiaojuan. Shift trend analysis of meteorological time series in the upper and middle reaches of Heihe River Basin[J]. Geographical Research, 2011, 30(11): 2059-2066.]

[30] 张光辉, 聂振龙, 张翠云, 等. 黑河流域走廊平原地下水补给变异特征与机制[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 715-720. [Zhang Guanghui, Nie Zhenglong, Zhang Cuiyun, et al. Mechanism and characteristics of groundwater replenishment variation in middle reaches of Heihe River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 715-720.]

[31] 吕明侠, 王一博, 刘国华. 黑河上游高山区浅层土壤水分变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 899-907. [Lyu Mingxia, Wang Yibo, Liu Guohua. Changes in shallow soil moisture and its influencing factors in the alpine region of the Upper Heihe River[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 899-907.]

[32] 刘志方, 刘友存, 郝永红, 等. 黑河出山径流过程与气象要素多尺度交叉小波分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1137-1146. [Liu Zhifang, Liu Youcun, Hao Yonghong, et al. Multi-time scale cross-wavelet transformation between runoff and climate factors in the upstream of Heihe River[J]. Arid Land Geography, 2014, 37 (6): 1137-1146.]

Flow regime alterations of upper Heihe River based on improved RVA

ZHANG Ruqiang[1], LIU Junguo[2], MAO Ganquan[2], WANG Li[3]

(1. Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong, China; 3. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Objective evaluation of flow regime alteration is the foundation of river ecological restoration and integrated water resources management. Various approaches that take hydrological year types into consideration could objectively evaluate the altered flow regime. Due to climate change in the recent decades, the flow regime of upper Heihe River has altered and needs further research. Our study area was the upper Heihe River, where we employed an improved range of variability approaches to analyze the alterations of the flow regime. Firstly, we applied the Mann-Kendall method to identify the catastrophe point. We analyzed the flow regime using hydrological alteration indicator method. This method includes 33 parameters classified into five groups: The magnitude of monthly water conditions, magnitude and duration of annual extreme water conditions, timing of annual extreme water conditions, frequency and duration of high and low pulses, and rate and frequency of water condition changes. Based on these groups, we used the range variability approach to calculate the degree of alteration of these 33 parameters. We measured the difference in typical hydrologic years before and after the catastrophe point using the Euclidean distance. The degree of hydrologic alteration was calculated considering the alteration of these 33 parameters and the difference between typical hydrologic years. Our results indicated that the year 2002 was catastrophic point of the river flow regime. The main hydrological type years before and after 2002 were normal flow and wet years. The improved method calculated an alteration degree of 74.62%, while the range of variability approach showed an alteration of 54.68%, indicating underestimation of the effect. Compared to 1960–2002, the monthly mean streamflow in 2003–2015 increased to various extents in the upper Heihe River's flow regime. The annual minima 1 day, 3 day, 7 day, and annual maxima 7 day decreased, whereas the other extreme water condition indicators increased. The frequency and duration of high and low pulses changed slightly, and the average peak flow duration decreased while the other indicators increased. Rate and frequency of water condition increased. The degree of hydrologic alteration was 74.62% considering the change of HYTs, which indicated a high alteration in the upper Heihe River's flow regime. Climate change is the main reason causing the flow regime alteration.

Keywords: alteration of river flow regime; range of variability approach; hydrological year types; upper Heihe River